



# MCP-PMT 開発研究

名古屋大学大学院  
高エネルギー素粒子物理学研究室

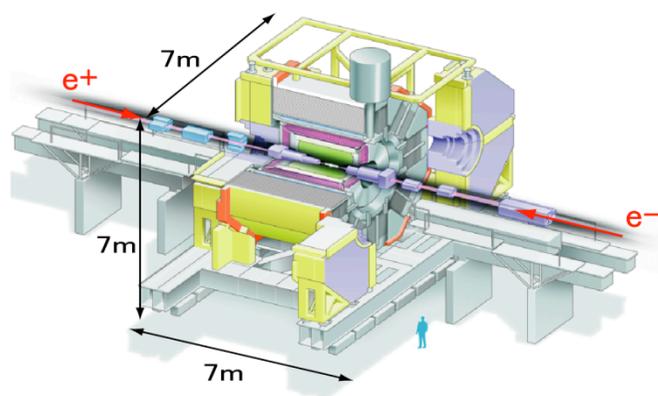
修士1年 神野 高幸

# TOPカウンターに求められる事

- 1、4GeV/cの $K\pi$ を $4\sigma$ 以上で識別
- 2、S-Belleで10年程度の使用に耐えられる

1 ビームテストにより、十分な性能を持つ事を確認

## 2 現在抱えている最も大きな問題



▶MCP-PMT

▶Life Time

▶Life Time測定

▶考察

▶まとめ

光検出器の性能維持

# MCP-PMT

K $\pi$  目標識別能力 **4 $\sigma$**  以上 (@4GeV/c)

識別能力

$$S(\sigma) = \frac{\Delta TOP + \Delta TOF}{\sigma_{TOP}} \sqrt{N}$$

$\Delta TOP$ : チェレンコフ光伝播時間差

$\Delta TOF$ : 粒子が TOP に入射するまでの飛行時間差

$\sigma_{TOP}$ : 時間分解能

N: 検出光子数

光検出器に求められる性能

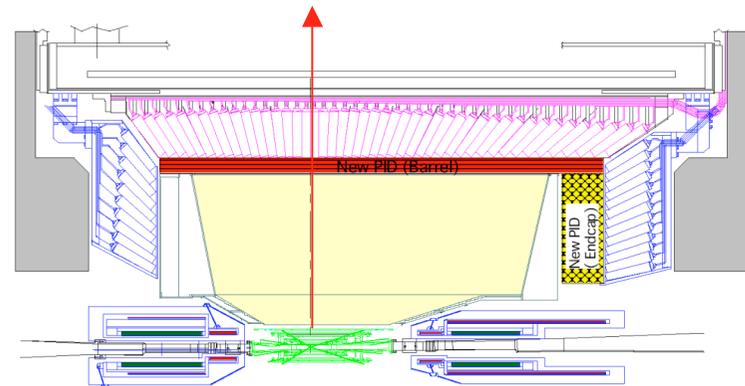
・ 1 光子検出効率 10% 以上

N ~ 20

・ TTS 45psec 以下

$\sigma_{TOP} \sim 65ps$

$\Delta TOP + \Delta TOF = 65ps$

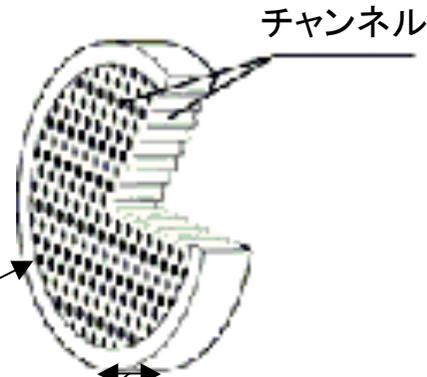


# MCP-PMTの構造

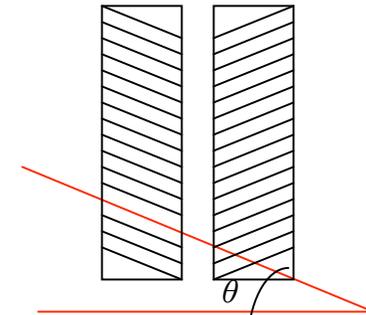
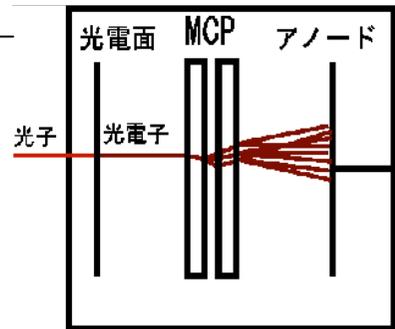
多数のガラスパイプ(チャンネル)を束ね、それぞれが独立の電子増倍部を形成する

チャンネル径 $\sim 10\mu\text{m}$

チャンネル長 $\sim 400\mu\text{m}$



## 動作原理



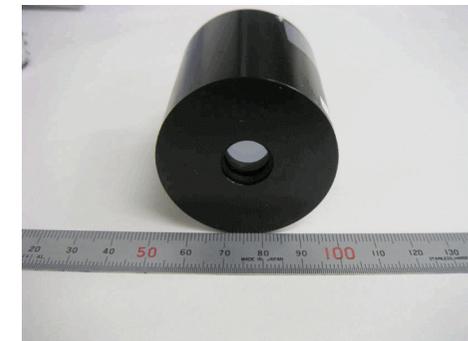
側面図

バイアス角 $\sim 13^\circ$

電子のすり抜け、イオンフィードバックを防ぐ(後述)

## ～～特徴～～

- TTS $<40\text{psec}$
- 一光子検出効率約10%



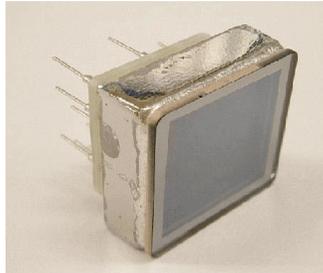
HPK製MCP-PMT

# TOPカウンター用角型MCP-PMTの開発

従来のMCP-PMTを...

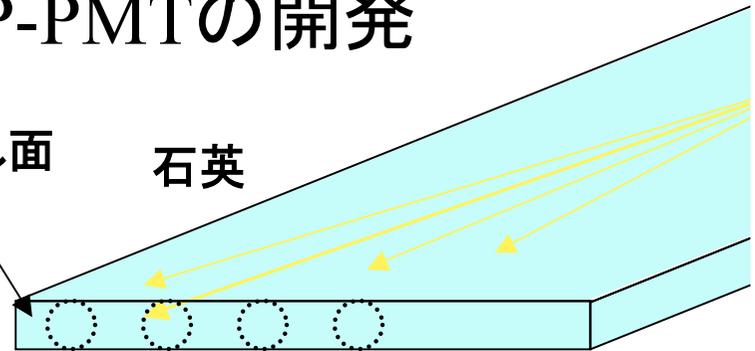


SL10外形



読み出し面

石英



角型MCP-PMT

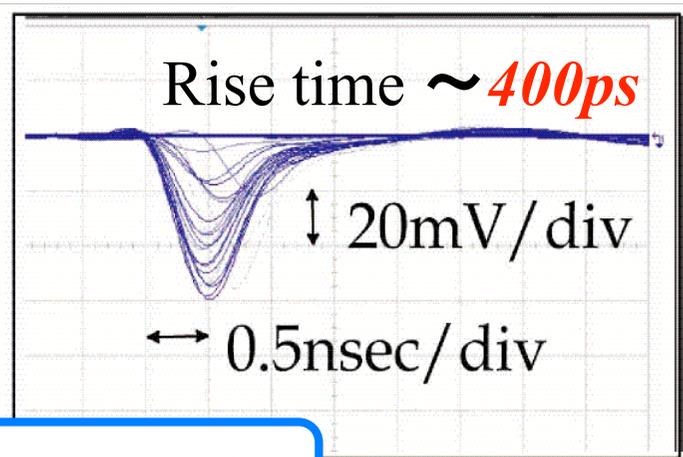


十分な有効面積を確保

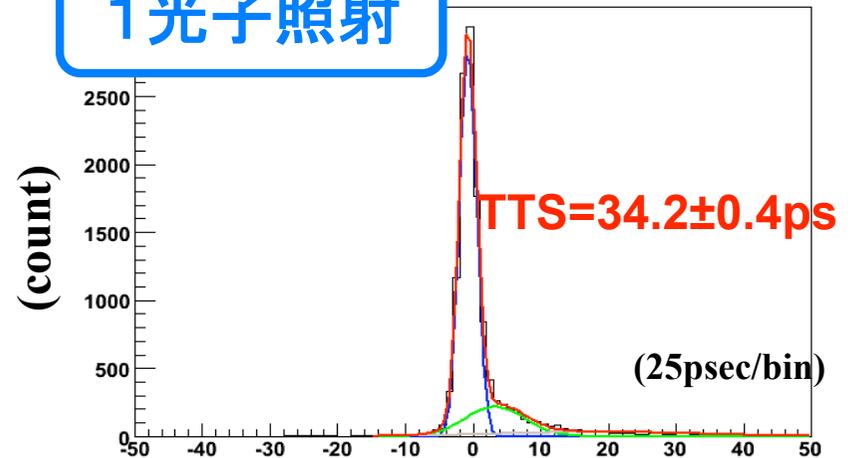
時間分解能 $\sim 35\text{ps}$

一光子検出効率 $\sim 10\%$

Rise time  $\sim 400\text{ps}$



1光子照射



MCP-PMTの問題点は

性能維持



Life Time が重要課題

# Life Time

MCP-PMTは光電面が劣化しやすい

➡ 検出効率が低下し易く寿命短い

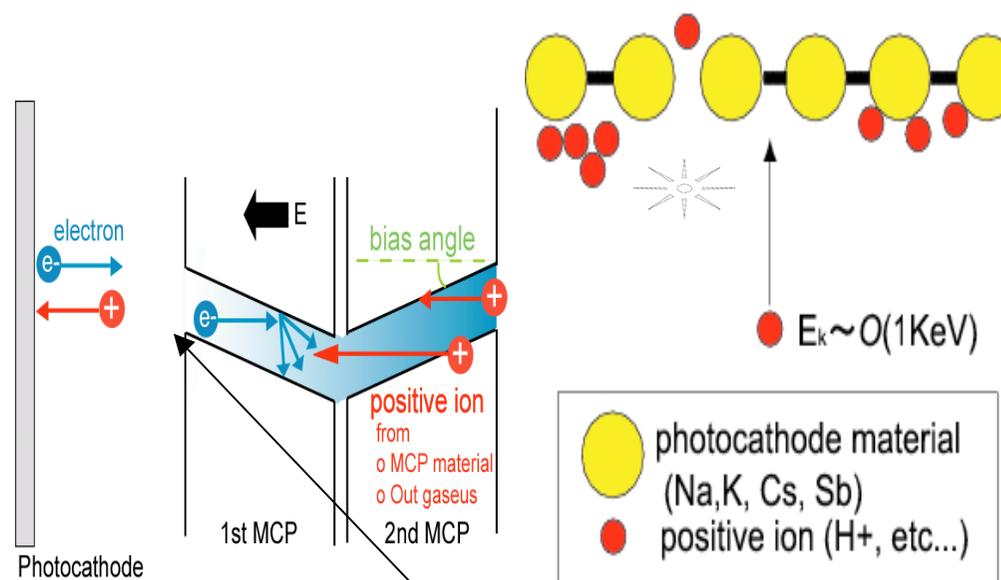
～光電面劣化のメカニズム～

## イオンフィードバック

増倍電子のエネルギーにより  
残留物質がイオン化される

電場に引かれて光電面に  
イオンが戻る

主に $H^+$



イオンフィードバック概念図

光電面劣化イメージ

光電面にイオンが到達し易い構造

# Life Time

超高輝度!

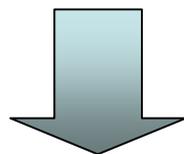
Super-BelleではPMTへの負荷が大きい従来の20倍の光子がPMTに照射する(年間MCP-PMT出力電荷量700mC/cm<sup>2</sup>)

従来の測定から通常1ヶ月程度で検出効率が元の値の80%まで低下する



$$S(\sigma) = \frac{\Delta TOP + \Delta TOF}{\sigma_{TOP}} \sqrt{N}$$

4σ以下になる



Life Time対策(光電面の保護)が必要

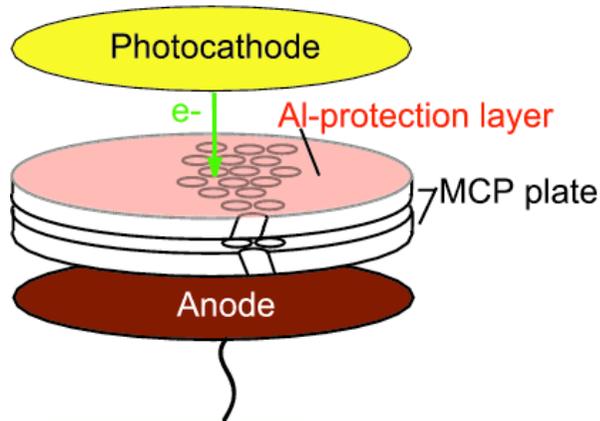
イオンフィードバック対策が有効と思われる

どうやって防ぐ??

# イオンフィードバック対策

## MCP表面へのAl膜蒸着

・MCP前段Al膜



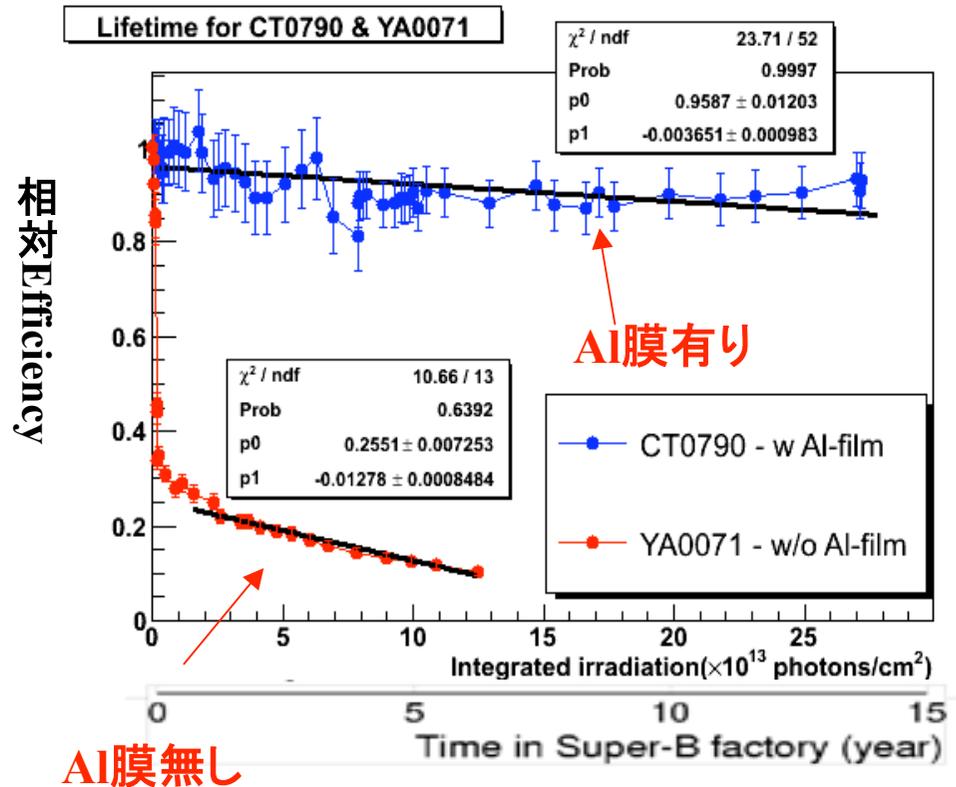
MCP1枚目表面にAl蒸着

Al膜がイオンフィードバックを抑える

But...

収集効率低下という欠点を持つ

従来の丸型MCP-PMTにおいて前段Al膜有りではLife Timeが飛躍的に延びるという成果を得た



イオンフィードバック対策の効果あり

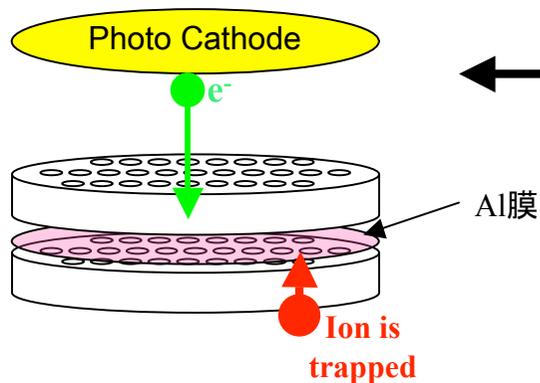
角型MCP-PMTの測定はまだ

# イオンフィードバック対策

## MCP表面へのAl膜蒸着

・MCP後段Al膜

MCP2枚目にAl膜を蒸着



検出効率の維持とイオンフィードバック対策を両立!!

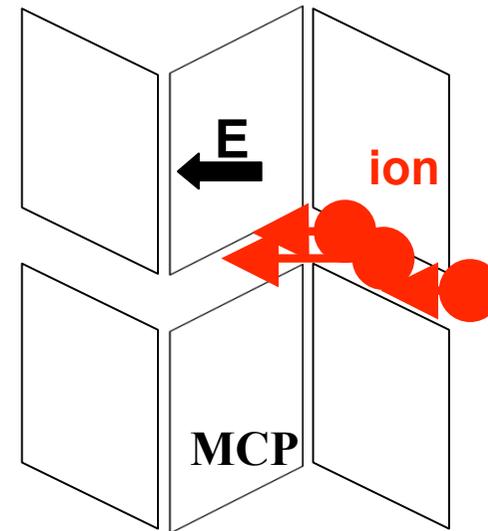
But...

Al膜がMCP2枚目にあるためにGainの低下が起こる

## MCP3段

・バイアス角によるバリア

新たな試み  
収集効率が保持  
できる



MCPを3段にし、バイアス角により壁面にイオンを吸収させる

但し、MCP2枚目で生成されるイオンは防げない

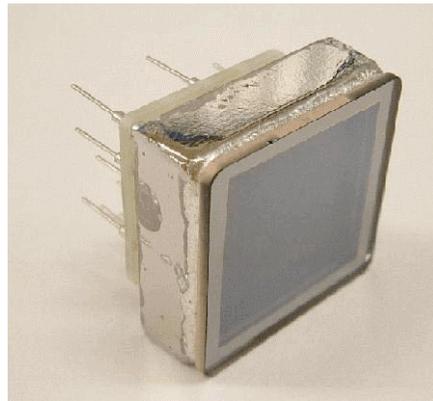
これらのイオンフィードバック対策の施されたMCP-PMTをLife Time測定にかけた!

# Life Time測定

## 測定するMCP-PMT

MCP前段Al膜有り YJ0006 } 角形MCP-PMT  
MCP後段Al膜有り YJ0011 } HPK社製

丸型MCP3段 BINP#249  
BINP#291



YJシリーズ  
(SL10)

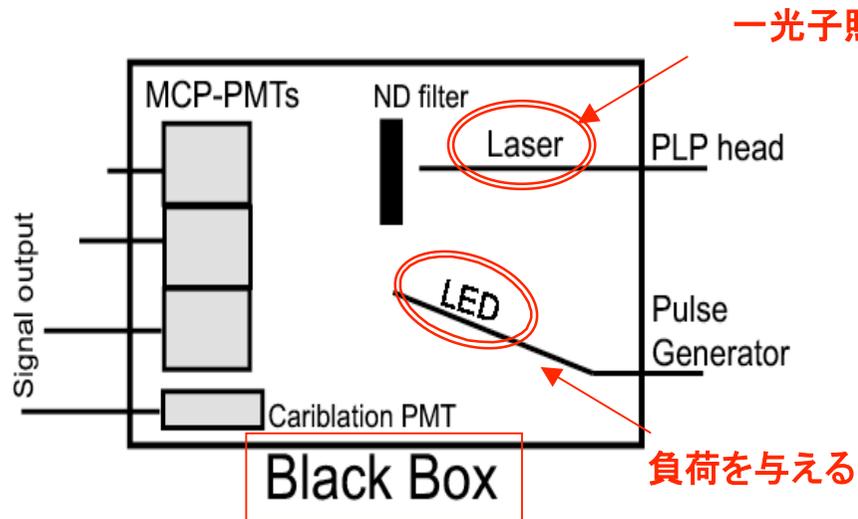


BINPシリーズ

全てイオンフィードバック対策を施されたMCP-PMT

# Life Time測定

## 測定方法



LED (multi-photons) で負荷を与え続ける  
2~3日に1度PLPにより基本性能測定  
(このときLEDは止める)

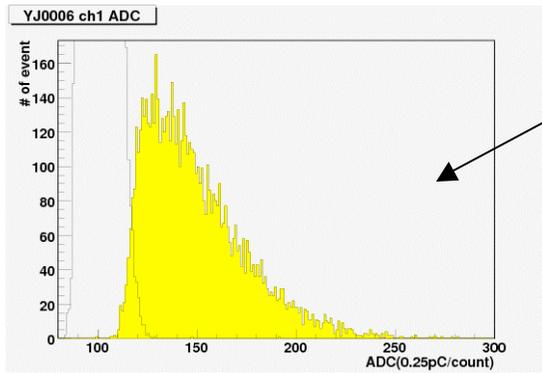
また、LED照射時の出力電荷量も  
測定、総出力電荷を計算

- 1、一光子あたりの出力電荷量(Gain)
- 2、一光子照射時の時間分解能
- 3、検出効率の変化

ch1	ch2	ch3	ch4
ch5	ch6	ch7	ch8
ch9	ch10	ch11	ch12
ch13	ch14	ch15	ch16

# Life Time測定

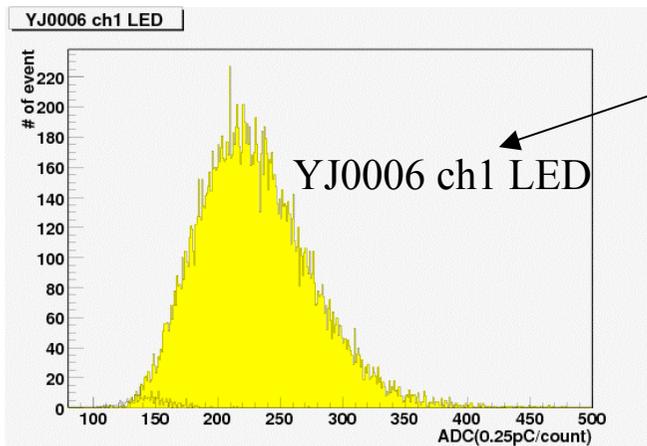
## 解析方法



YJ0006 ch1 PLP  
(前段Al膜有り)

PLP(一光子)照射における出力電荷分布。

- ピーク値から**Gain**を出す
- Entry数の変化から**相対Efficiency**を出す。検出効率の劣化具合を測定。



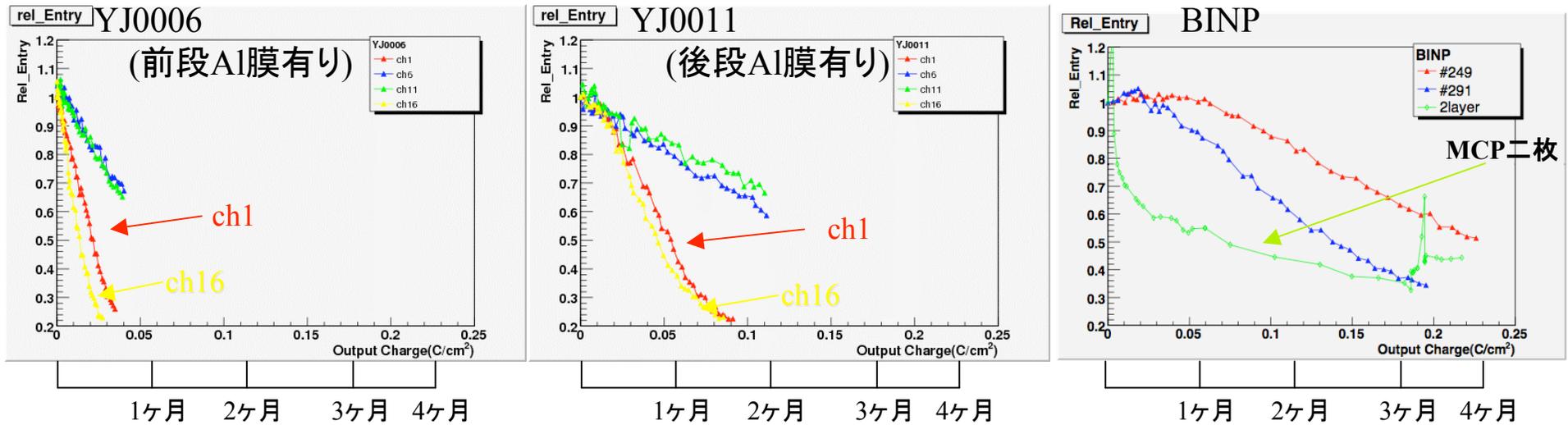
LED照射における出力電荷分布

- Mean値より**総出力電荷量**を求める

LED一発あたりの出力電荷量の期待値

# 測定結果(1)

## 相対Entry (Efficiency) の変化

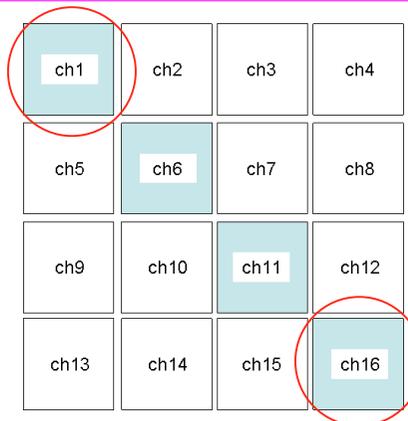


YJ0006 : 4日~14日

YJ0011 : 13日~32日

BINP : 1ヶ月~2ヶ月

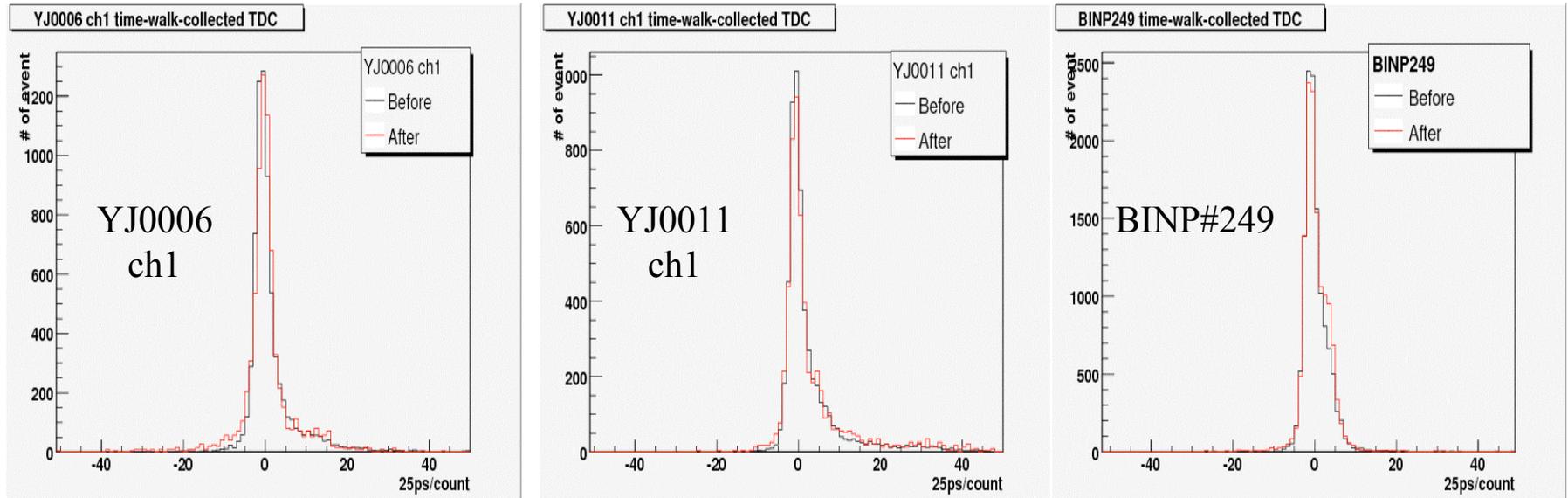
角型MCP-PMTでは角のchの劣化が激しい



イオンフィードバック対策にも関わらずどのMCP-PMTでも十分なLife Timeをもたない

# 測定結果(2)

## 時間分解能の変化(Time-Walk補正後)



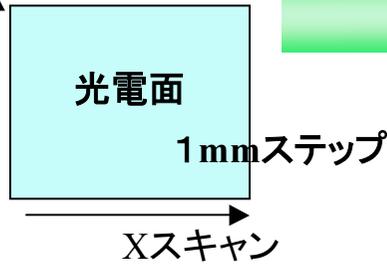
TDC分布の変化 : 黒 Life Time測定開始時 赤 Life Time測定終了時

	開始時	終了後
YJ0006	39.5ps	40.7ps
YJ0011	35.8ps	35.4ps
BINP249	33.4ps	34.8ps

測定前後で時間分解能は  
ほぼ一定値を維持

# Life Time測定前後の光電面量子効率

Yスキャン



目的; 面一様性の変化を見る

初期Q.E.を

— として、  
初期値から...

— 約70%

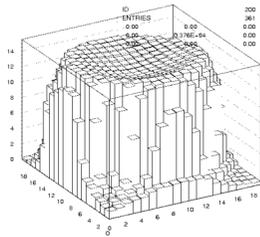
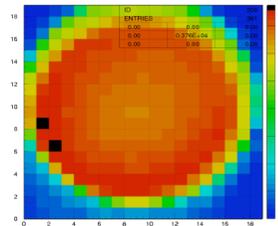
( — 約50% )

— 約30%

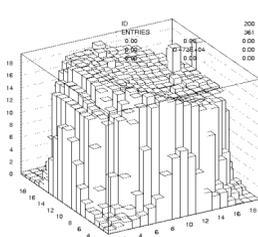
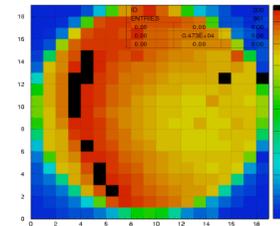
減少

YJシリーズ(SL10)

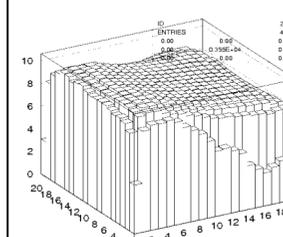
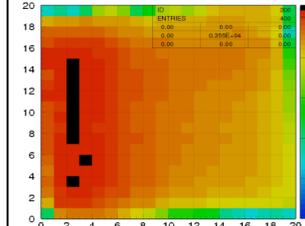
**淵側のチャンネルでQ.E.劣化激しい**



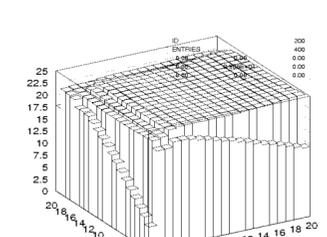
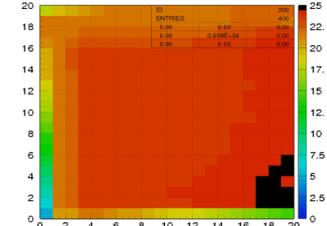
BINP#249 Before



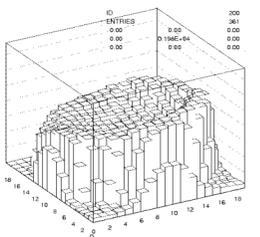
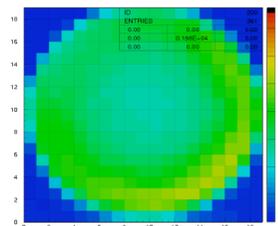
BINP#291 Before



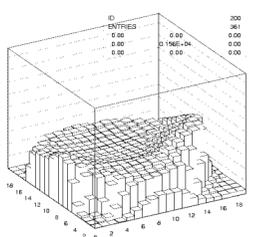
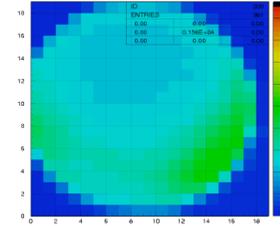
YJ0006 Before



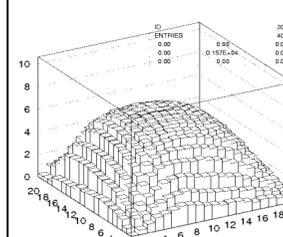
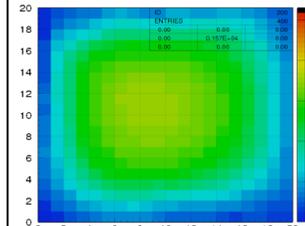
YJ0011 Before



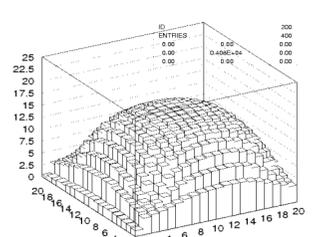
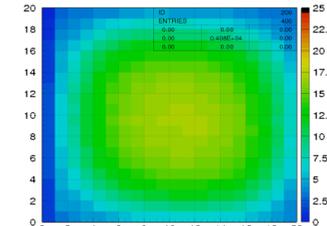
BINP#249 After



BINP#291 After



YJ0006 After



YJ0011 After

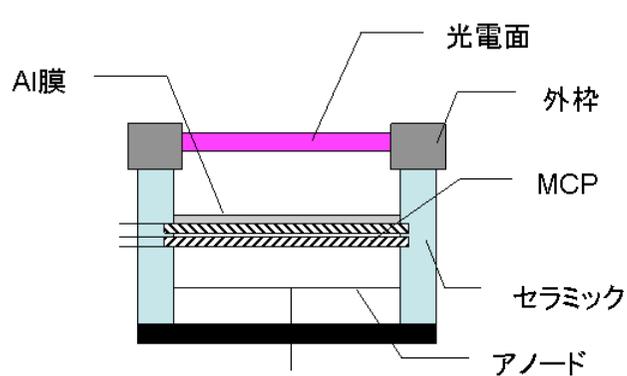
# 考察

イオンフィードバック対策を施されたMCP-PMTのLife Timeを測定

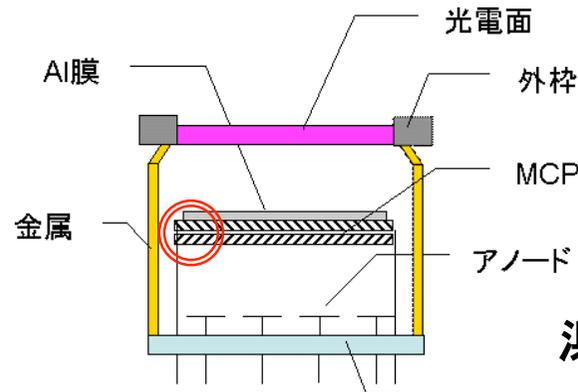
角型前段Al膜あり

- イオンフィードバック対策にも関わらず寿命が伸びない
- 光電面淵側の劣化が激しい

丸型と角型の構造の違いから考える必要あり



従来の丸型



角型

側管の隙間を通るファクターがある  
(中性ガス)  
(Because 光電面と側管は同電位)

浜松ホトニクス社で対策品を試作

寿命が延びる結果を得る

# まとめ

- TOPカウンター性能維持のため、新しくイオンフィードバック対策を施したMCP-PMTのLifeTime測定を行った。

TTSは十分な性能保持  
Efficiencyは、

- BINP社製 丸型MCP三段

少し効果が見られたものの、要求を満たさない

- HPK社製 角型MCP-PMT前段AI膜あり  
後段AI膜あり

要求を満たさない

丸型前段AI膜とは様子が違う

新しい発見 **淵側の量子効率低下が激しい**

中性ガスの可能性あり

浜松ホトニクス社で改良型を試作  私達の実験室で測定



**BACK UP**  
**SLIDEs**

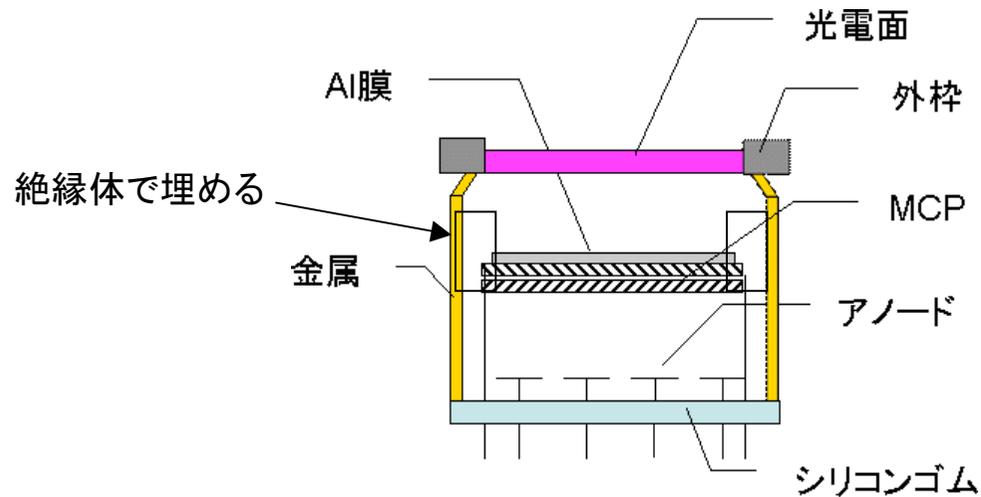
# 考察

丸型前段Al膜有りでは良いLife Timeを得ることが可能



SL10でも実現可能なはず！！

SL10で側管～MCP間を塞ぎ、光電面とMCP以下の空間を遮蔽することで  
Long Lifeを得る可能性が見込める



# Life Time測定

## 測定するMCP-PMTの初期性能

メーカー	HPK		BINP	
外形	16ch SL10		丸型 18mmφ	
シリアル No.	YJ0006	YJ0011	♯249	♯291
対策	MCP 前段 Al 膜有り	MCP 後段 Al 膜有り	MCP3 枚	
Q.E.(λ=400nm)	9.02%	23.0%	14.0%	18.0%
C.E.	36%	60%	63%	68%



シリアル NO.	印加 HV	MCP1 枚あたりの電圧	Gain*	TTS	Dark	
YJ0006	ch1	3240V	900V	$1.01 \times 10^6$	39.5 psec	17.1 Hz
	ch6	3240V	900V	$7.78 \times 10^5$	36.4 psec	17 Hz
	ch11	3240V	900V	$7.06 \times 10^5$	35.2 psec	41.9 Hz
	ch16	3240V	900V	$8.91 \times 10^5$	35 psec	87.1 Hz
YJ0011	ch1	3420V	900V	$3.62 \times 10^6$	35.8 psec	2210 Hz
	ch6	3420V	900V	$2.49 \times 10^6$	34.6 psec	2200 Hz
	ch11	3420V	900V	$2.11 \times 10^6$	33.5 psec	1900 Hz
	ch16	3420V	900V	$2.98 \times 10^6$	35 psec	2400 Hz
BINP♯249	3200V	900V	$6.00 \times 10^6$	33.4 psec	31600 Hz	
BINP♯291	3200V	900V	$5.73 \times 10^6$	63.3 psec	11700 Hz	

YJシリーズ  
(SL10)

BINPシリーズ

ch1	ch2	ch3	ch4
ch5	ch6	ch7	ch8
ch9	ch10	ch11	ch12
ch13	ch14	ch15	ch16

YJシリーズは  
ch1, ch6, ch11, ch16  
を測定

全てイオンフィードバック対策を施されたMCP-PMT

\*YJシリーズにおいて一光子Peakが不明瞭なため(後述)、初期GainはMean値から算出している

# Life Time測定

## 設定条件

MCP-PMTの**Dead Time**以上のレートでLEDを照射

**Dead Time**とは・・・

電気信号が線型性を保つのにかかる時間

帯電したものを電氣的に中和するのに要する時間

要は時定数 $\tau$

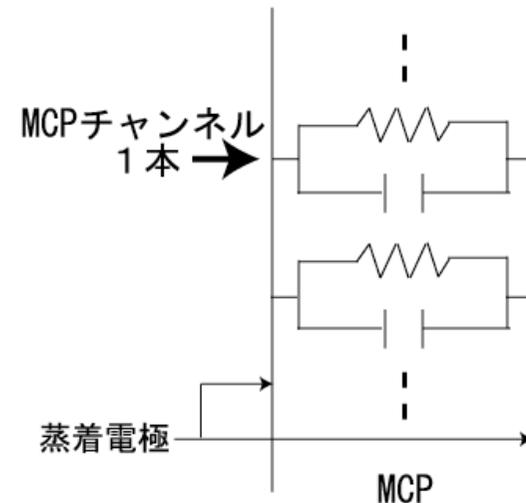
$$\tau = RC$$

カウントレート $\sim 1 \times 10^7 \text{cm}^2/\text{sec}$  以上で線型性を失う

今回の測定の設定値

約 $5 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{sec}$

～Dead Timeをクリアしている～



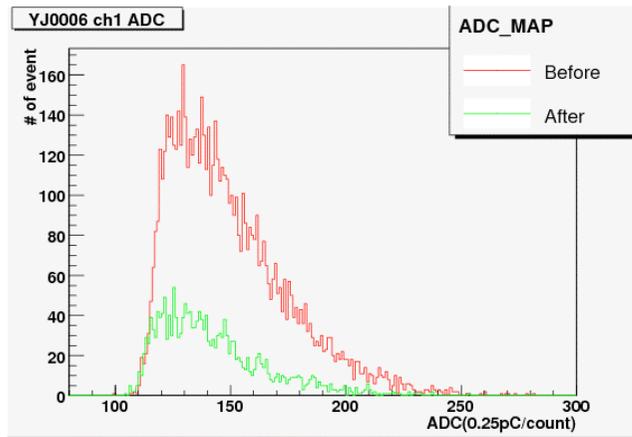
MCP-PMTをRC回路とみて  
Dead Timeを計算できる

$R \sim 100-1000 \text{M}\Omega$

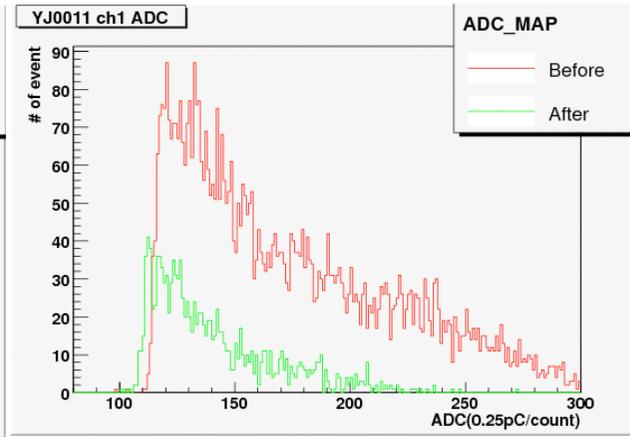
$C \sim 20-40 \text{pF}$

# 測定結果

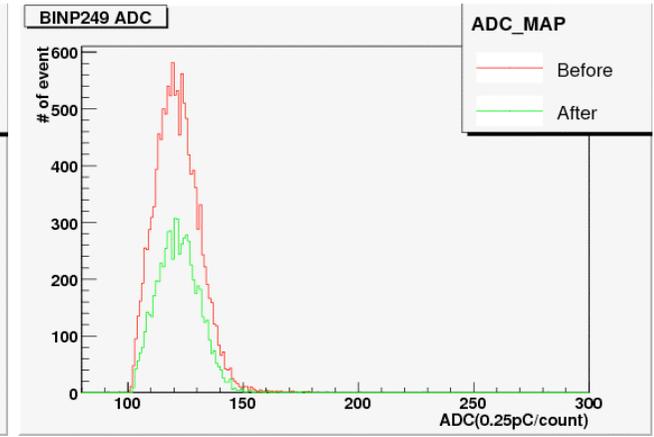
## Dataの変化



YJ0006 ch1



YJ0011 ch1



BINP#249



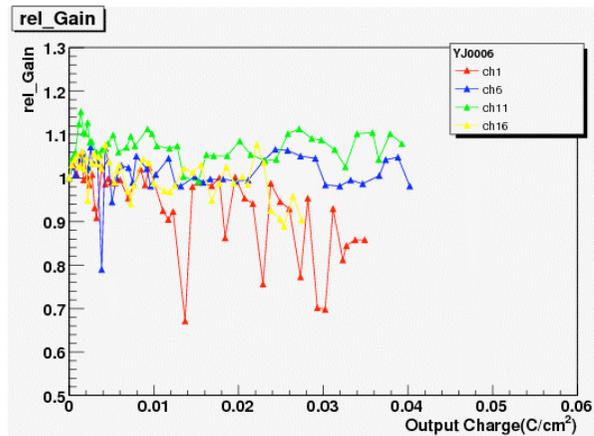
**Before Life Time Measurement**



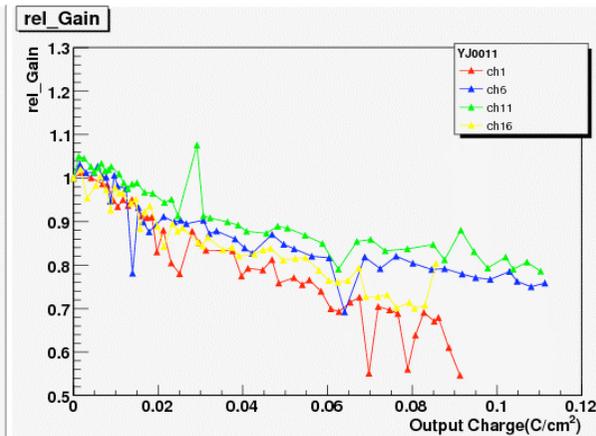
**After Life Time Measurement**

# 測定結果(2)

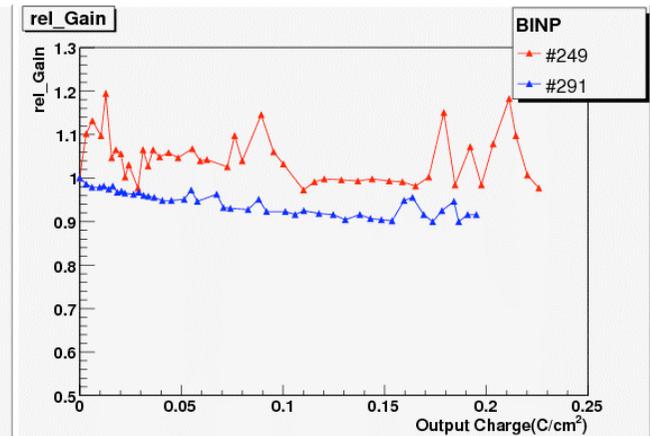
## 相対Gainの変化



YJ0006  
(前段Al膜有り)



YJ0011  
(後段Al膜有り)



BINP  
(MCP3段)

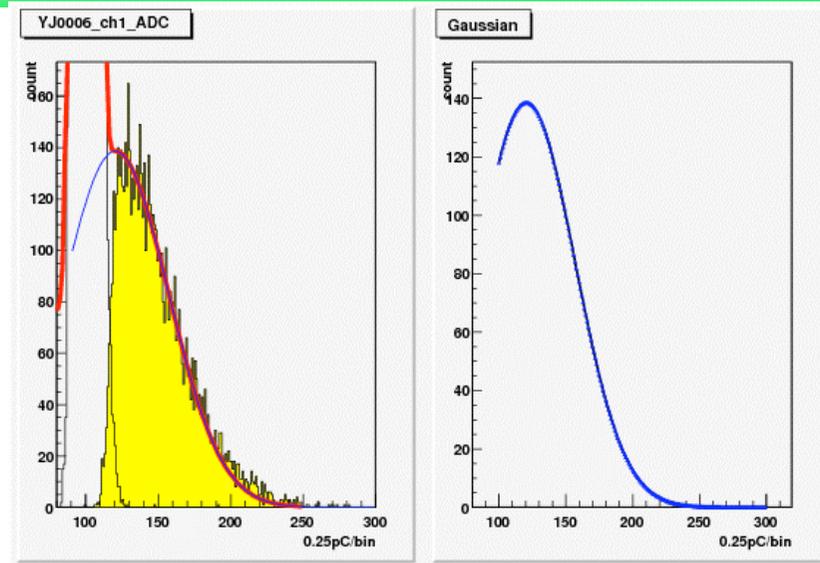
他のMCP-PMTに比べ、YJ0011(後段)ではGainの低下が早い  
Gainが低い(前述)ためMCP2枚目で増倍電子が飽和に  
達していないことより、変化に敏感であるためと考えられる

また、Gainの低下はそれほど大きくないことから、Efficiencyの低下  
はQ.E.の劣化が主な原因を占めていることがうかがえる

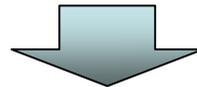
\*横軸を、YJ0006では1/4に、YJ0011では1/2にしている

# 相対Gain評価

## Pedestalに埋もれた部分の見積もり



PedとDataを含め、2つのGaussianでフィッティング



Data部分を占めるGaussianを取り出し、ADC=100 $\sim$  $\infty$ の加重平均をみる

Pedに埋もれた部分が相対Gainに与える影響・・・約3~5%程度

# ここまでのまとめ

イオンフィードバック対策が施してあるにも関わらずLife Timeが短い

特に、前段AI膜ありでは過去にLife Timeが延びるという成果を得ている  
(ただし、SL10タイプではなく従来の丸型タイプ)

SL10(YJシリーズ)では淵側のQ.E.劣化が激しい

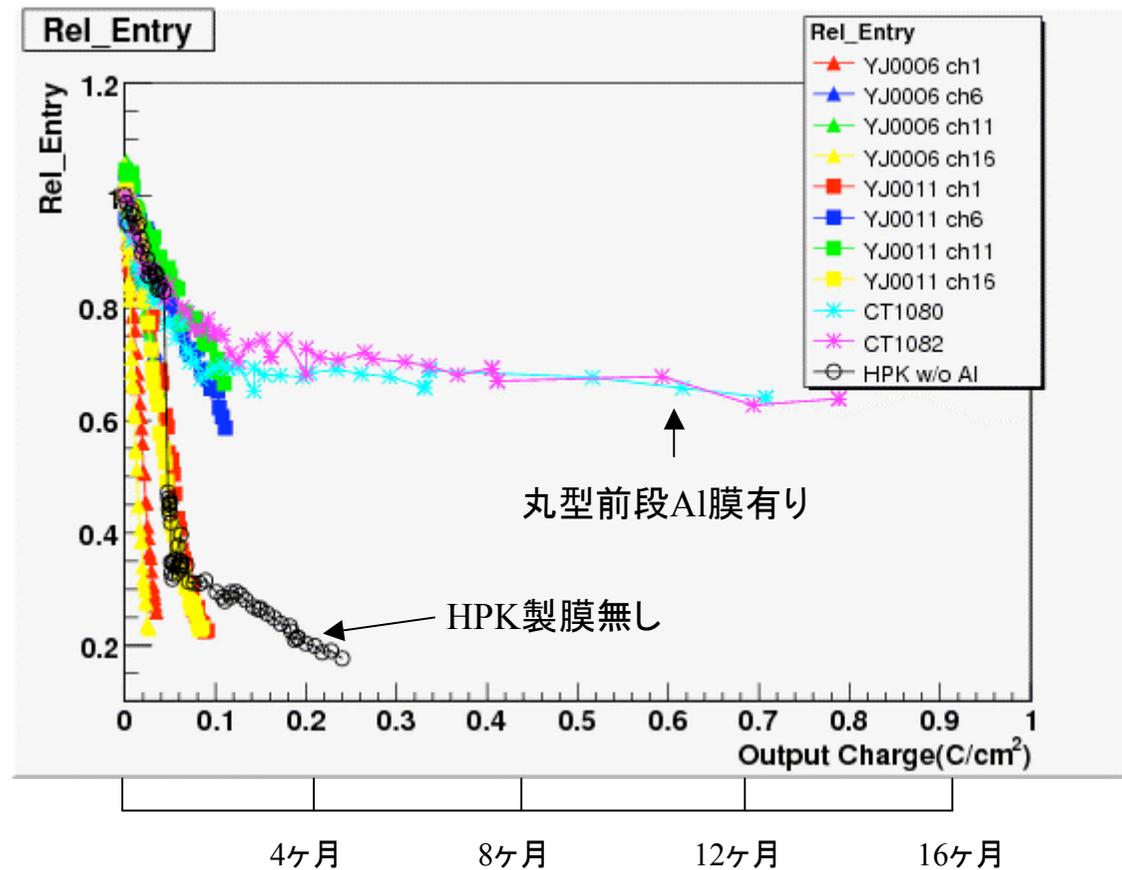


続いて、丸型の前段AI膜有り(CTシリーズ)の追試、  
過去のデータとの比較を行う

Back Upにまわす?? 時間と相談・・・

# 過去のデータ

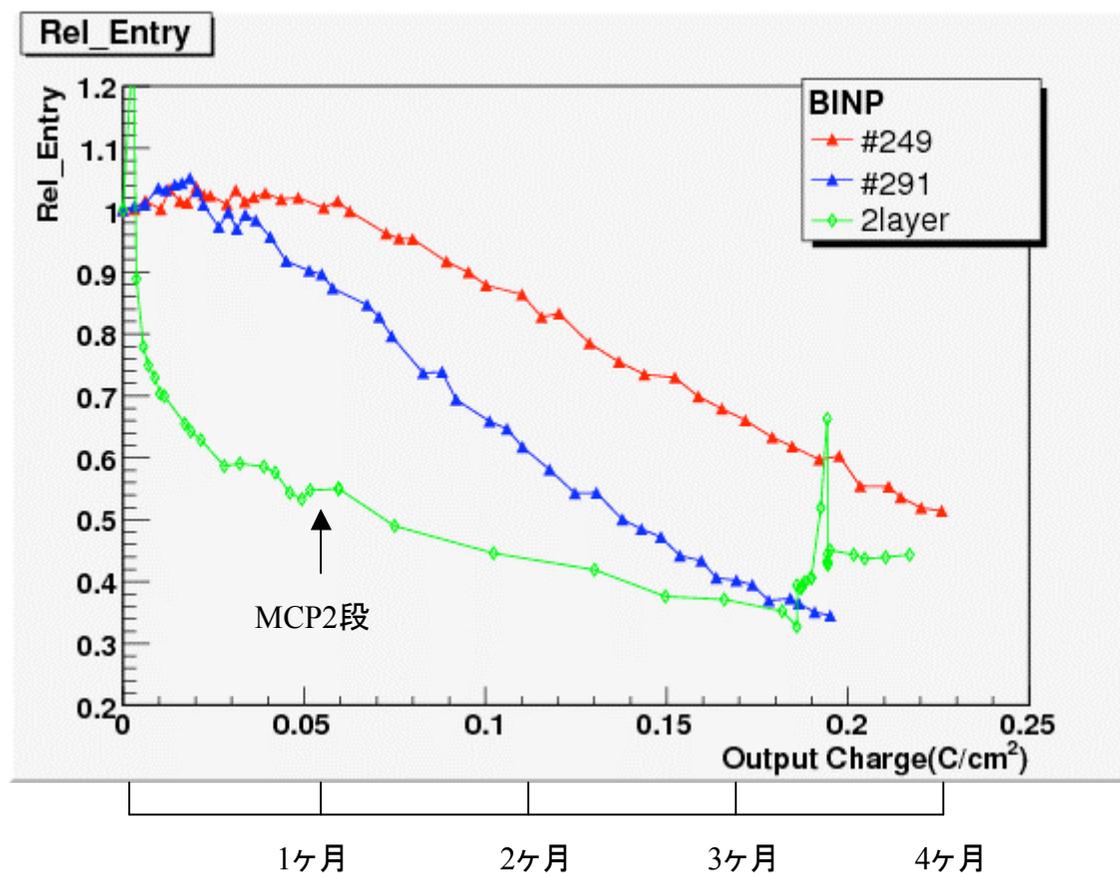
## HPK製丸型膜無しと比較



SL10Al膜有り(YJシリーズ)ではAl膜無しと同程度の寿命

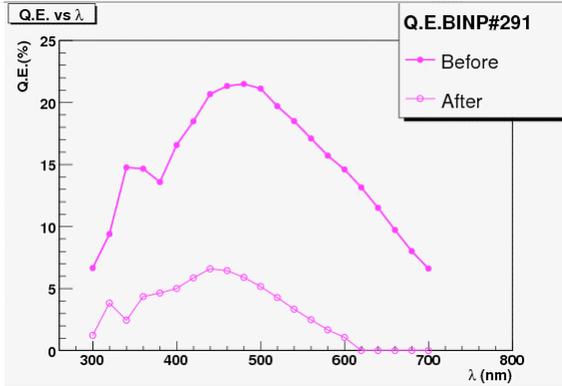
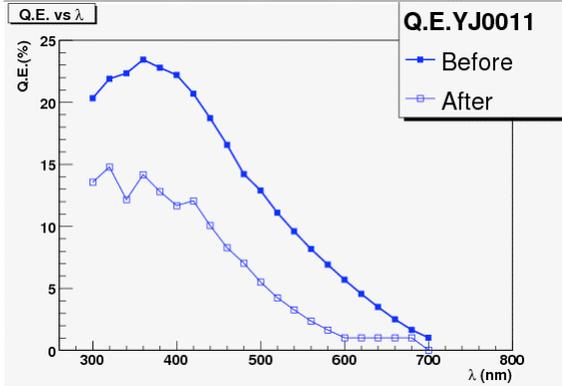
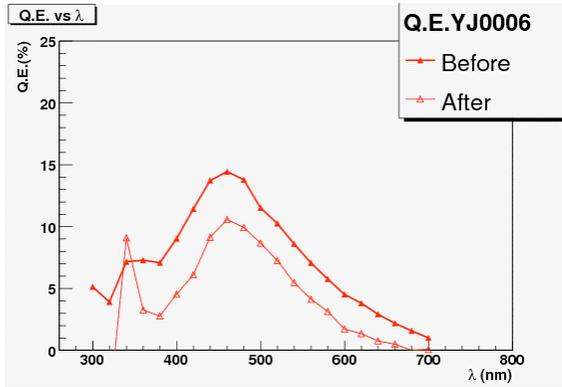
# 過去のデータ

## BINP製MCP2段と比較

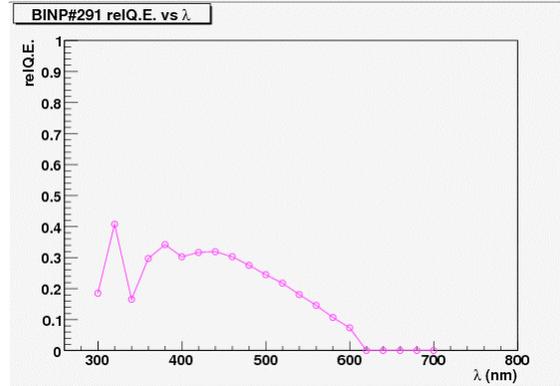
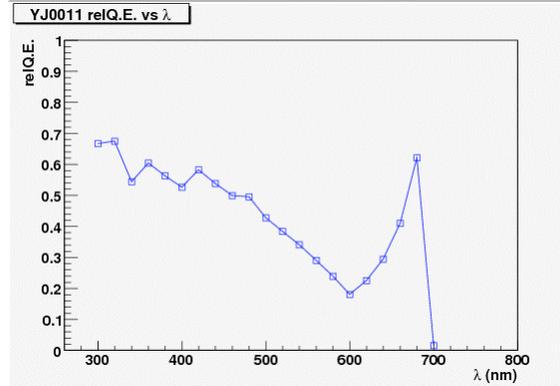
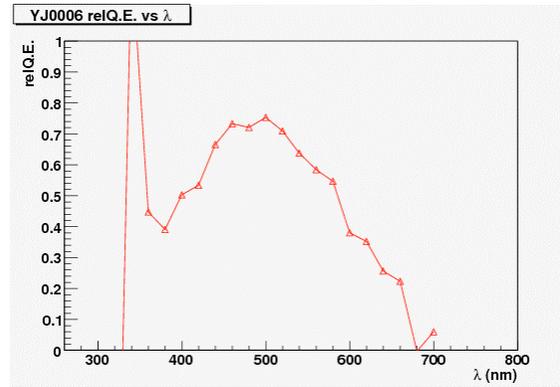


MCPを3段にした効果で寿命は約8倍～12倍程度延びてはいるが十分な値ではない

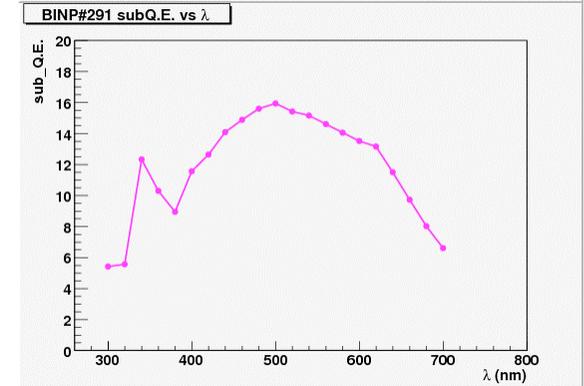
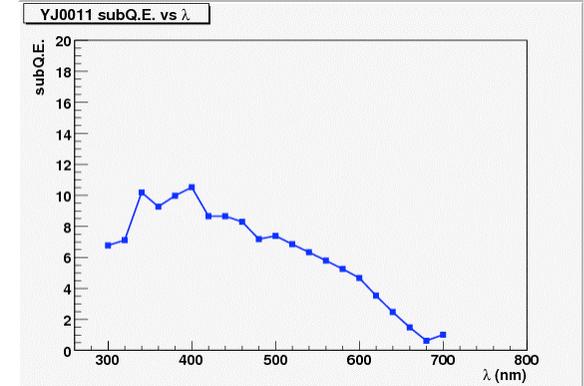
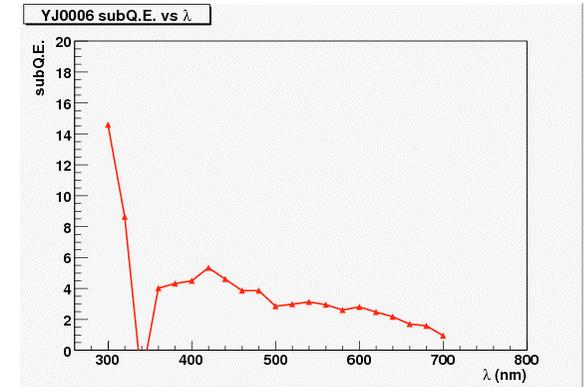
## Q.E.vs $\lambda$ Before After



## Q.E.vs $\lambda$ Relative

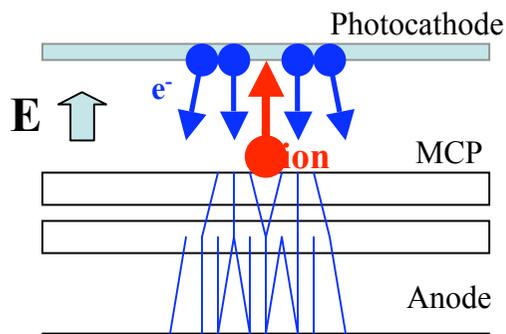


## Q.E.vs $\lambda$ subtraction



# アフターパルス

～イオンフィードバック由来の信号～



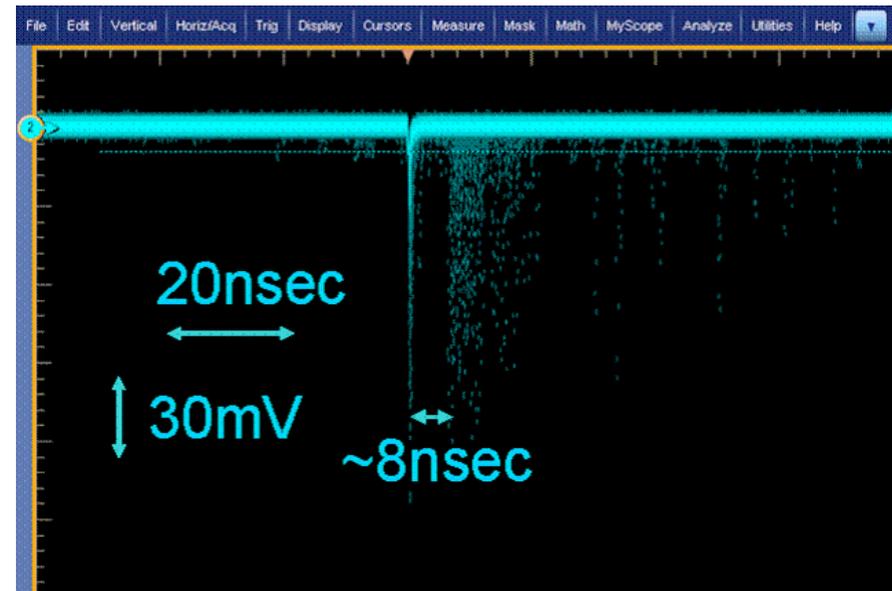
アフターパルス到達時間  
理論値  
本信号から約5~12nsec後

## 発生原理

イオンが光電面  
を叩く

光電面から電子  
が出される

電子は通常増幅  
過程を経て信号と  
して検出される



CTシリーズのアフターパルス

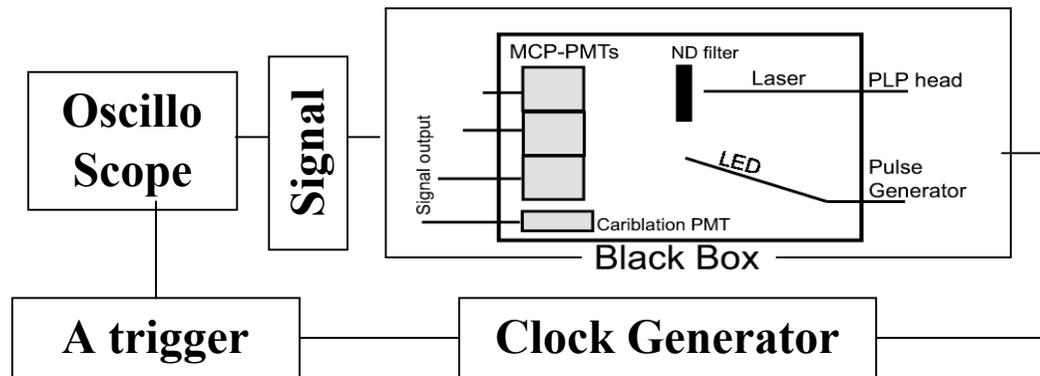
アフターパルスからイオンフィードバックの頻度を見積もることができる



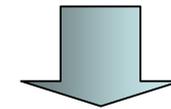
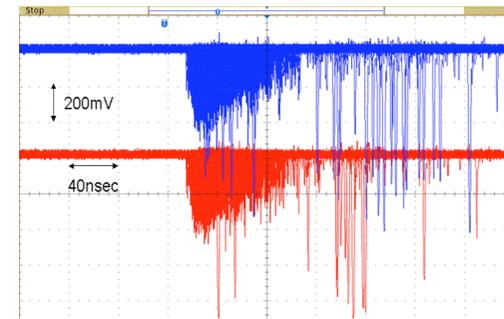
Life Time測定と平行してアフターパルスを測定

CTシリーズとYJシリーズ・BINPシリーズとでイオンフィードバックの量は違う??

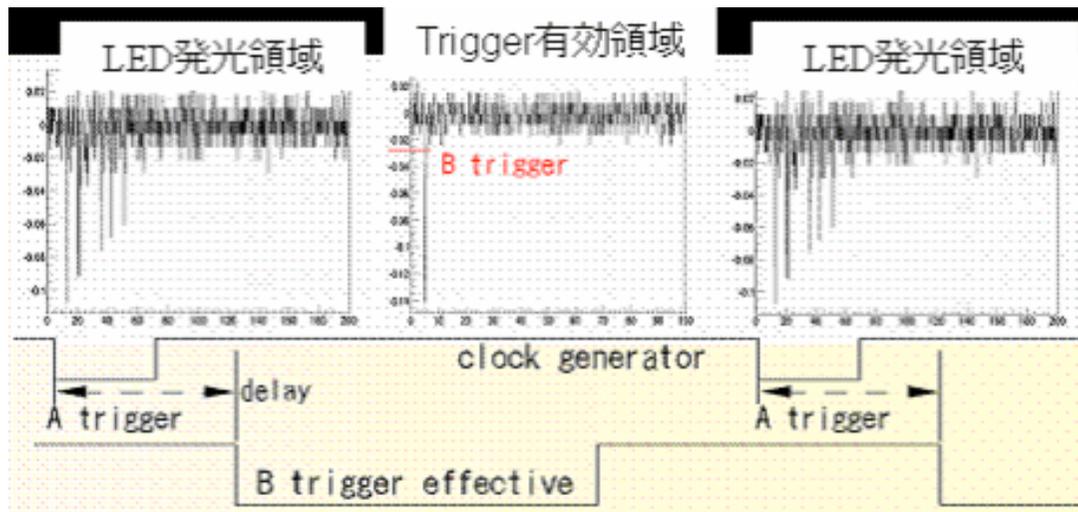
# アフターパルスSetup



LED・・・TTSが大きい



Dark信号にトリガーをかけ、  
Darkに付随する信号を測定



**B trigger**にかかったDark信号に注目

オシロスコープでtag Dark～アフターパルス間の時間差、波高、電荷量を測定

Clock Generatorから発行されるTriggerを**A trigger**とし、  
A triggerにDelayをかけた領域を**B trigger**発行領域とする

# アフターパルス評価

Darkに対してアフターパルスが検出されるRateを解析

LEDにより発生するイオンフィードバック量を計算

一光子レベル  
とする

AP Rate

出力電荷量の比 (Dark=一光子として)

$$N_{AP} = \frac{AP_{count}}{Trg_{count}} \times \frac{LED_{Mean}}{PLP_{Mean}} \times t_{LED}$$

光った回数

$N_{AP}$ : Life Time測定Data Take間でのアフターパルス発生回数

$AP_{count}$ : アフターパルス測定におけるアフターパルスカウント数

$Trg_{count}$ : アフターパルス測定におけるトリガー数

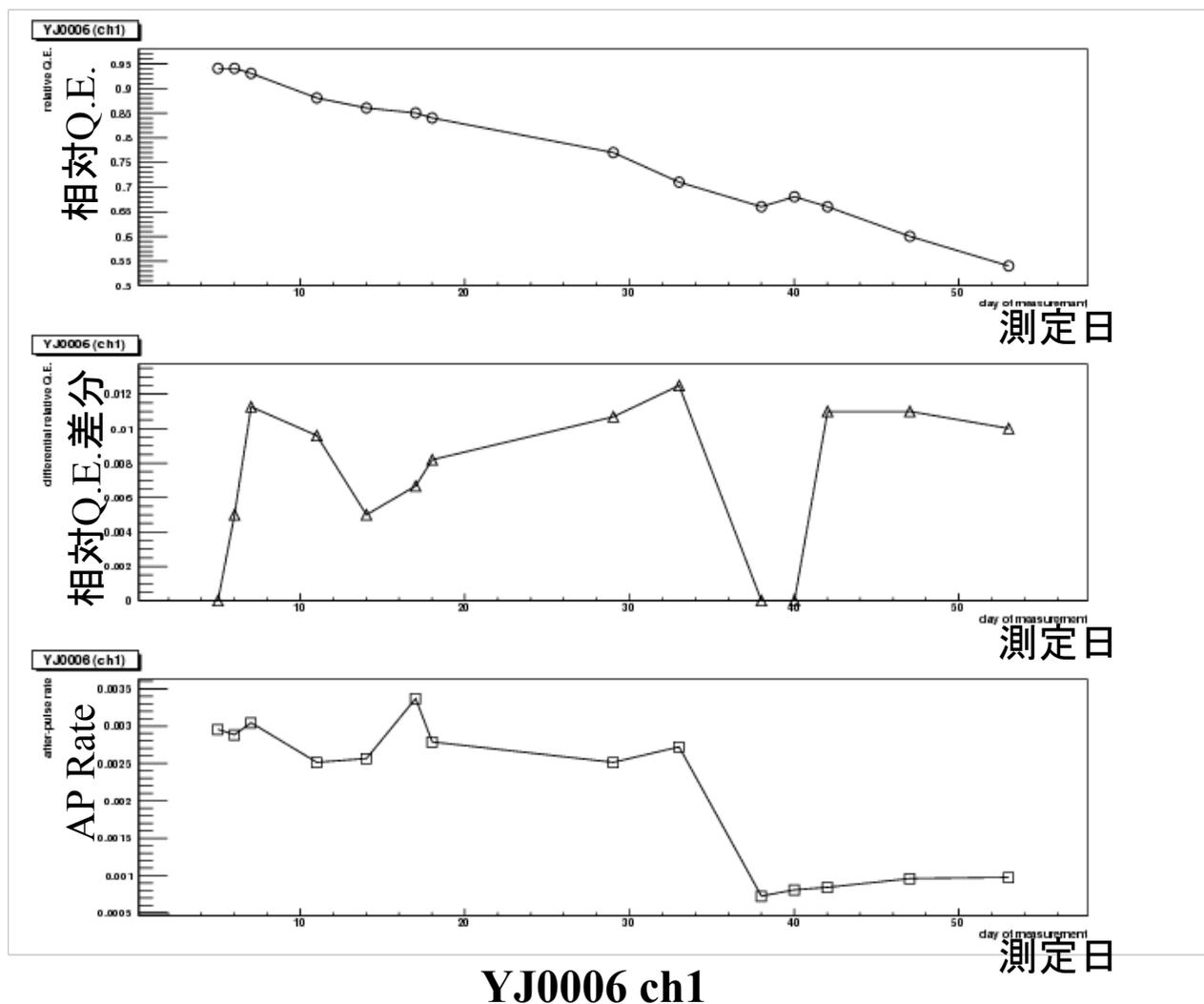
$LED_{Mean}$ : LED分布におけるMean値

$PLP_{Mean}$ : PLPのADC分布におけるMean値

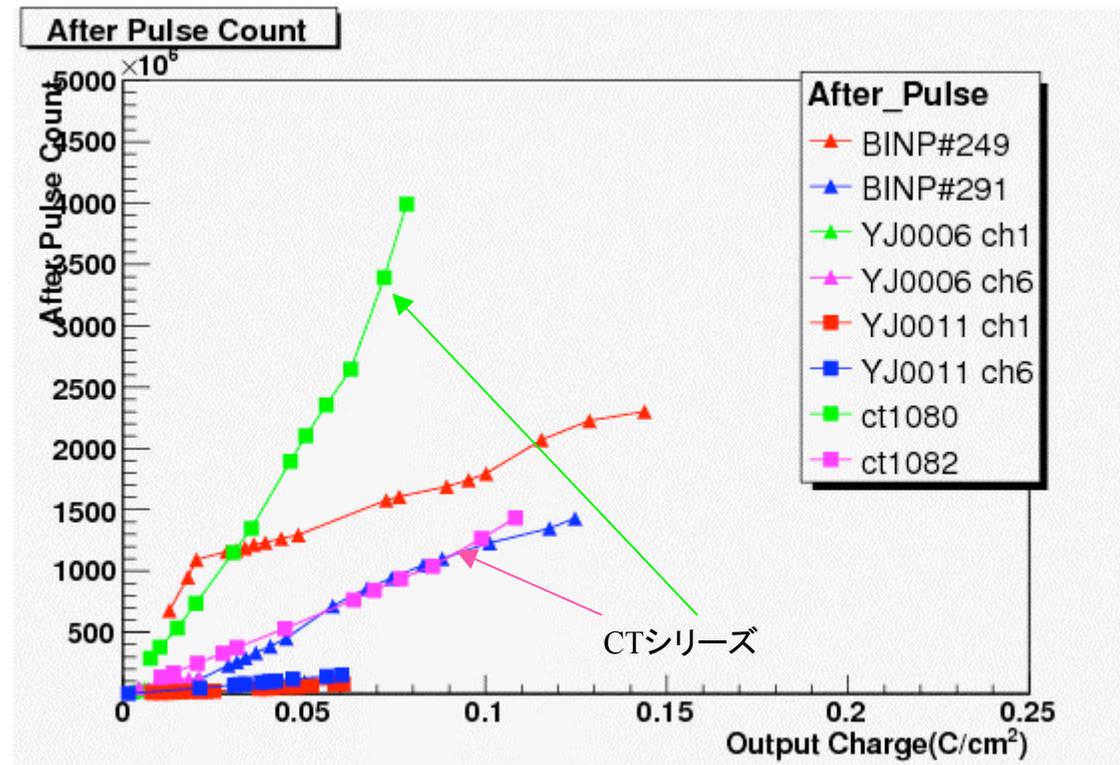
$t_{LED}$ : Life Time測定Data Take間でのLED照射回数

寿命が長いCTシリーズではイオンフィードバックを十分抑えられていると  
考え、他のMCP-PMTとCTシリーズを比較する

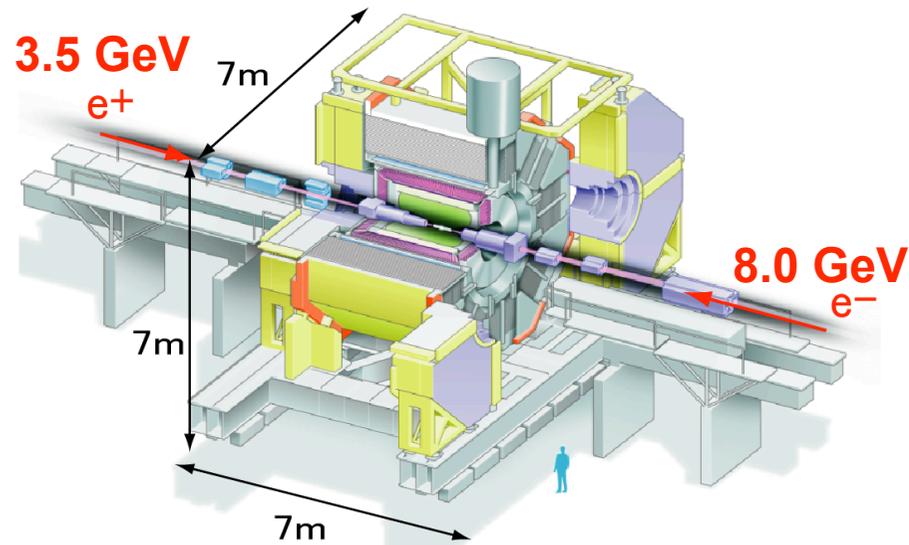
# アフターパルスとQ.E.劣化の速度



# アフターパルス結果



# S-Belleへのアップグレード



Belle検出器

## S-Belleへのアップグレード

S-Belleでは・・・

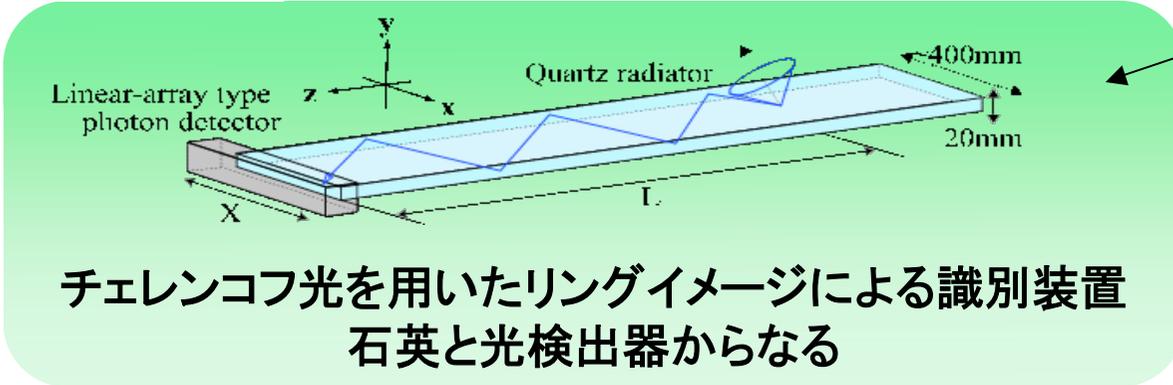
- 統計量UP
- 検出器の精度UP

統計量

ルミノシティ(輝度)を10~50倍に増強

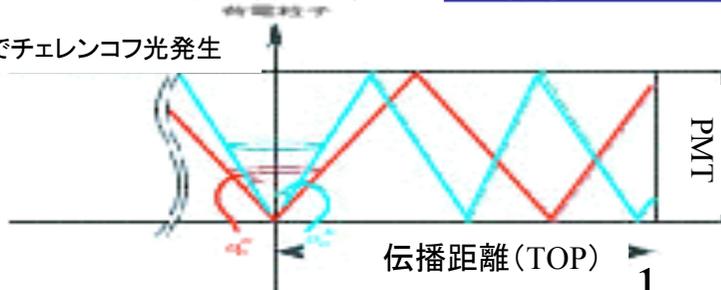
# TOPカウンター

π/K識別が重要



“チェレンコフ光 放出角は入射粒子の速度により決まる”

石英でチェレンコフ光発生



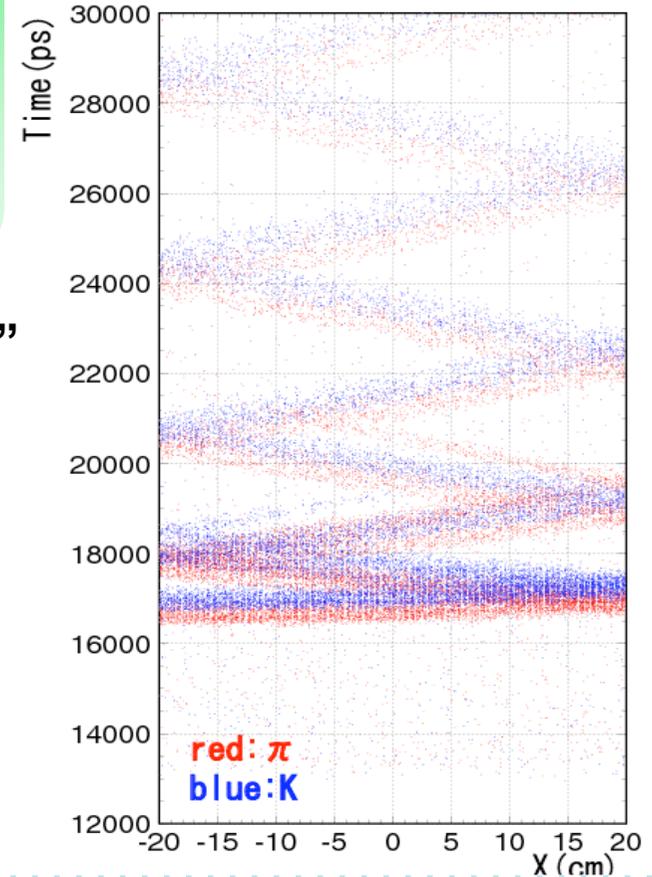
チェレンコフ光放出角  $\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$

$n$ : 屈折率  
 $\beta$ : 速度

TOPカウンターにより速度が分かる

$$m = p \sqrt{\left(\frac{1}{\beta}\right)^2 - 1} = p \sqrt{n^2 \cos^2 \theta_c - 1}$$

質量の算出  
↓  
粒子識別



伝播時間と位置情報よりリングイメージを再構成、π/Kを識別

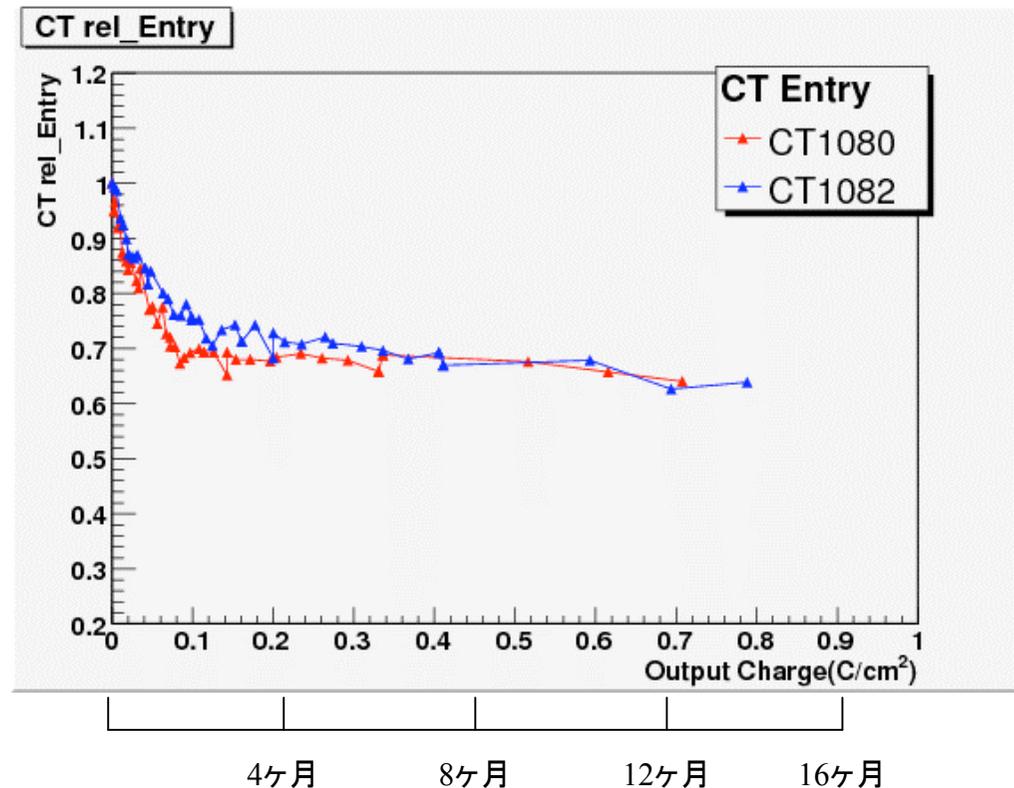
# 丸型前段AI膜あり(HPK製CTシリーズ)

丸型前段AI膜有り2本(CT1080、1082)の  
Life Time測定



シリアル No.	CT1080	CT1082
外形	丸型 11mmφ	
対策	MCP 前段 AI 膜有り	
印加 HV	3400 V	3400 V
MCP1 枚あたりの電圧	970V	970V
初期 Q.E.	19.6%	18.2%
Gain	$1.8 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$
TTS	34.1 psec	34.3 psec
Dark	6784 Hz	1475 Hz

初期性能

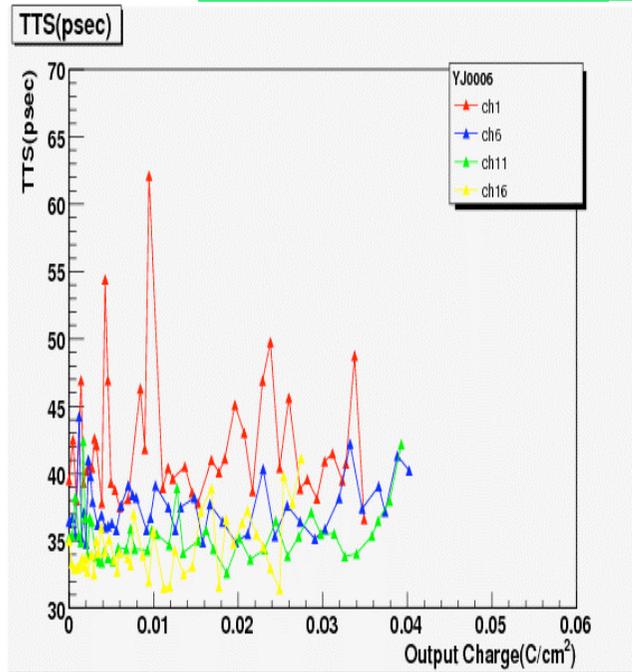


相対Efficiencyが約70%まで落ちるがその後一定の値を維持し続ける

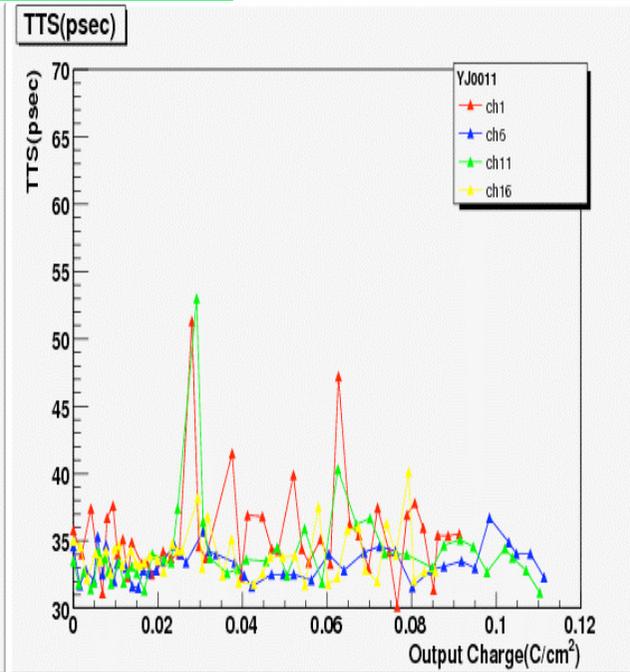
S-Belleでの1年を過ぎてもある一定のEfficiencyを保つ

# 測定結果(2)

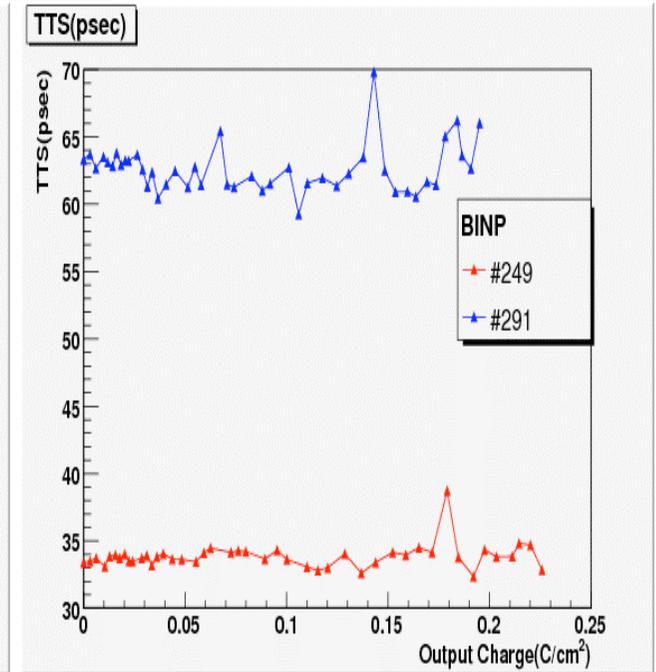
## TTSの変化(Time-Walk補正後)



YJ0006



YJ0011



BINP

測定を通じてTTSはほぼ一定値を維持

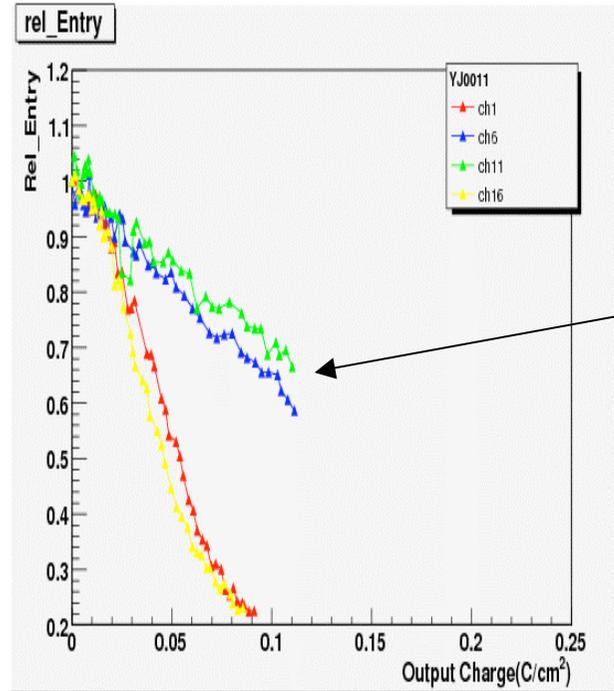
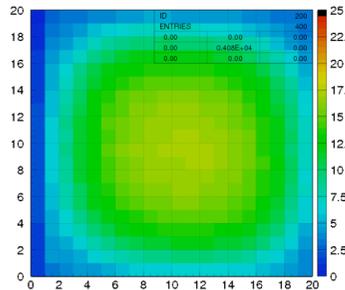
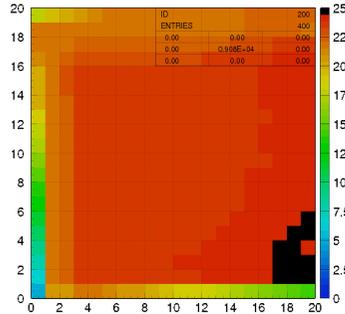
# Life Timeの要因

初期Q.E.を  
— として、

— 約70%

— 約50%

— 約30%



変化率〜Rel Efficiency

寿命の主な要因は、光電面量子効率の劣化による

# Life Time測定

## 評価の基準

700mC/cm<sup>2</sup>/year  
(@gain=2×10<sup>6</sup>)

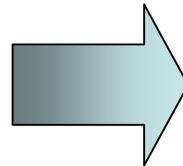
主にSpent Electronにより  
S-Belleでは年間  
700mC/cm<sup>2</sup>の負荷がかかる

Efficiencyが初期値の80%  
に低下したところが寿命

Efficiencyが80%低下した  
ところで4σを実現できなくなる

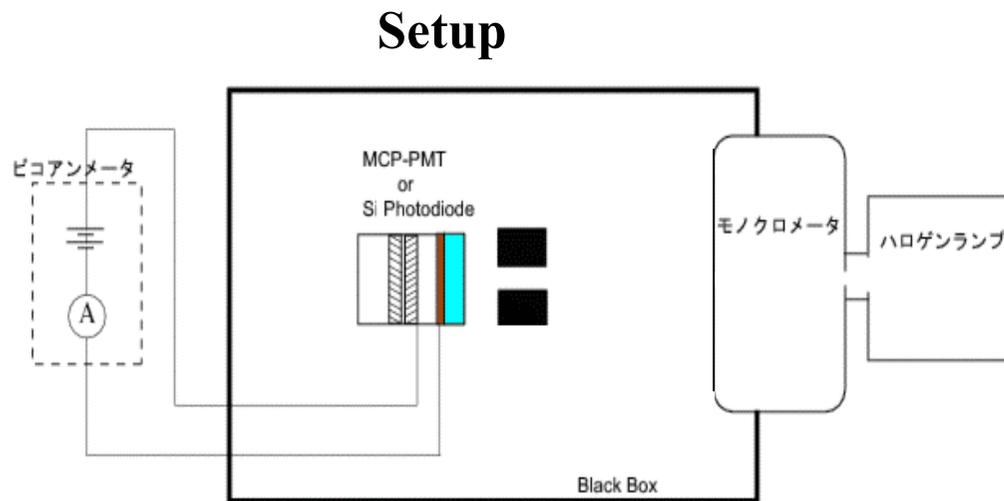
識別能力  $S(\sigma) = \frac{\Delta TOP + \Delta TOF}{\sigma_{TOP}} \sqrt{N}$

**横軸** 総出力電荷量  
**縦軸** 相対Efficiency



LED照射時のADC分布のMean  
PLP照射時のADC分布のEntry数

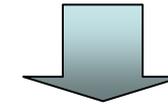
# 光電面量子効率の測定



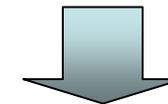
$$Q.E. = \frac{I_{MCP} - Dark_{MCP}}{I_{PD} - Dark_{PD}} \times Q.E._{PD}$$

## 測定原理

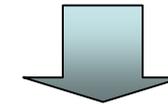
ハロゲンランプからの光の波長をモノクロメータで指定



光を1mmφに絞り、MCP-PMTに入射させる



MCP表面を1mm stepでスキャンし、電流値(光電子による)を読む



Referenceのフォトダイオードと比較してQ.E.を求める

